干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

腾格里沙漠不同类型沙丘土壤水分含量与地形-植被因子关系研究

孙琰蕙[1]， 张定海[1]， 张志山[2]

(1. 甘肃农业大学理学院数量生物研究所,甘肃 兰州 730070；
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 土壤水分是沙区主要的生态限制因子,其分布受气候、地形和植被等众多因素的影响。以腾格里沙漠沙坡头地区3种类型的沙丘(固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘)为研究对象,利用方差分析和冗余分析(RDA)等方法对沙丘不同部位和不同深度土壤水分的分布特征及其与地形-植被因子之间的关系进行了综合分析。结果表明:(1) 不同类型沙丘上0~300 cm的土壤水分随着深度的增加而增加,表层土壤水分的波动程度大于中层和深层。(2) 固定沙丘不同部位及不同深度的土壤水分之间没有明显的差异,半固定沙丘和流动沙丘迎风坡与丘底的土壤水分高于背风坡和丘顶。(3) 固定沙丘上的土壤水分受地形-植被因子的影响较半固定沙丘和流动沙丘小,影响固定沙丘土壤水分的主要因子有坡向、高差和灌木多度。(4) 地形-植被因子与研究区绝大多数半固定沙丘和流动沙丘的土壤水分均有负相关关系。研究揭示了腾格里沙漠土壤水分的分布规律及其与地形-植被因子的关系,对制定相应的防风固沙措施以及建立科学合理的植物固沙模式有积极的指导作用。

关 键 词: 腾格里沙漠; 土壤水分; 地形因子; 植被因子; 冗余分析(RDA)

文章编号:

荒漠化是人类目前面临最严峻的环境问题之一[1],我国是受荒漠化影响较为严重的国家之一,第五次荒漠化监测显示,我国荒漠化面积高达2.6116×10^6 km^2,占我国国土面积的27.20%,占全球荒漠化面积的5.23%。沙漠生态系统是我国干旱、半干旱生态系统的主要类型,其在维持生态系统稳定性和提高生态系统服务功能方面具有重要作用[2]。土壤水分是沙漠生态系统植被格局和过程的驱动力,控制着植物的生长、植被演替和景观分布等主要过程。研究沙漠土壤水分有助于在沙区水文过程和生态过程之间建立定量联系[3]。然而,受气候、地形和植被分布等因素的影响,土壤水分的分布特征和影响因素非常复杂。已有的研究表明,地形因子和植被因子是影响土壤水分的主要因子,地形因子是气候、植被等影响因子的主要载体[4],植被因子是土壤水分在沙漠生态系统中的集中体现。因此,全面分析不同沙区土壤水分的分布特征及其与地形和植被的关系,是深入系统掌握沙区土壤水分分布特征的前提,也是未来在不同区域开展防风固沙工程和沙区植被建设与管理的保障。

目前,国外针对地形-植被因子对沙区生态系统土壤水分的影响研究,主要是基于地理信息系统(GIS)和地统计学原理等方法对区域土壤水分状况进行全面的评估。如Abuhashim等[5]结合土壤水侵蚀和土壤适宜性参数评估系统,评估了易受土壤侵蚀的地点。Fijakowska等[6]计算了土壤流失方程的地形因子值:坡长和坡度,并详细分析了总的最小二乘因子值,并提出了1种评估同质区域(如农田)内最小二乘因子值的方法。国内研究多集中于不同群落土壤水分分布以及不同种群土壤水分利用

收稿日期: 2022-01-18; **修订日期**: 2022-03-11
基金项目: 甘肃省科技计划项目(21JR7RA831);国家自然基金项目(41661022)资助
作者简介: 孙琰蕙(1998-),女,硕士,主要从事空间统计研究. E-mail: 908937337@qq.com
通讯作者: 张定海(1981-),男,博士,副教授,主要从事生态水文模型、统计学在生态学和经济学中的应用研究. E-mail: zhangdh@gsau.edu.cn

效率等。如张军红[7]分析了不同固定程度油蒿群落的土壤水分特征、降水对土壤水分的补给状况、生物结皮对降水再分配过程的影响，并结合油蒿的生理生态特征，探讨了土壤水分在油蒿群落演替过程中的作用。目前，在小尺度上有关地形和植被因子对土壤水分影响的研究较少。因此，本研究采用样带数据，对腾格里沙漠沙坡头地区3种类型沙丘（固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘）上不同部位（迎风坡、背风坡、丘顶、丘底）的地形–植被因子对土壤水分的影响进行研究，以期更加细致地探讨地形–植被因子对土壤水分的影响规律。

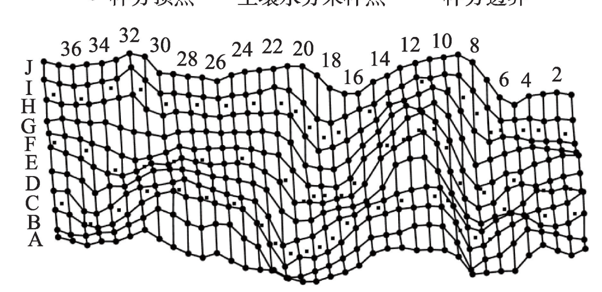
1　研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南边缘的沙坡头地区，地理位置介于37°30′~40°10′N、102°20′~105°55′E之间，海拔1200~1400 m，占地面积约5922.4 km^2。该地区年平均温度约为10.0 ℃，冬季最低温度为−25.1 ℃，夏季最高温度达38.1 ℃[8]，年均降雨量176.5 mm，年平均风速2.9 $m\cdot s^{-1}$，全年日照时数3264 h，年平均沙暴天数大约为59 d，年均蒸发量1500~2000 mm[9]，固定沙丘、半固定沙丘年降雨量约为120 mm。土壤基质为松散贫瘠的流沙，主要土壤类型为灰钙土和风沙土，重量土壤含水量介于0.5%~3.0%之间[10]。固定沙丘、半固定沙丘植被覆盖度高达15%~20%，固定沙丘植物生长较密，主要是灌木、半灌木和草本类植物，灌木主要有柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）、油蒿（*Artemisia ordosica*）、小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）、乔木沙拐枣（*Calligonum arborescens*）和沙木蓼（*Atraphaxis bracteata*）等旱生灌木。流动沙丘几乎不生长植物，盖度在1%以下。

2　材料与方法

2.1　试验设计

2011年10月—2020年10月在腾格里沙漠沙坡头地区的固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘上分别设置了1块有代表性的试验样地，样地包含沙丘的不同部位（迎风坡、背风坡、丘顶和丘底）。固定沙丘样地位于红卫地区（104°46′01″E，37°27′00″N；40 m×140 m）、半固定沙丘样地位于长流水地区（104°46′12″E，37°27′26″N；40 m×140 m）、流动沙丘样地位于沙坡头地区（105°00′44″E，37°29′28″N；40 m×140 m）。图1为半固定沙丘上的样地示意图，将样地划分为4 m×4 m的小样方，合计10行（A~J）、37列（1~37）共370个小样方（由于样地大小的不同，固定沙丘样地有10行、45列共计450个小样方，流动沙丘的样地有10行、37列共计370个小样方）。选择样地中的3行（C行、F行和I行）中的样方作为土壤水分采样点，在地形起伏较大的地方加密采集，共计71个水分采样点。利用土钻法测量0~300 cm的土壤水分，土壤水分共分为18层，分别为：0~5 cm、5~15 cm、15~25 cm、25~35 cm、35~50 cm、50 cm以下每隔20 cm采样1次。选择其中的1行（E行），利用50 cm×50 cm的草本小样方调查了E行中每个小样方（4 m×4 m）中的草本盖度、草本多度、凋落物。同时，利用标记牌标记样地内每1株灌木，测定了其株高和冠幅（东西方向和南北方向）以及所在样方的灌木盖度和多度。本研究利用实时动态定位的测量方法（RTK）对样地中每1株灌木和每1个样方的4个顶点进行定位测量，得到其经纬度和海拔。利用样方定位点的数据，计算了每个小样方对应的地形因子，主要包括坡度、坡向和高差。本研究实验设计的流程如图2所示。



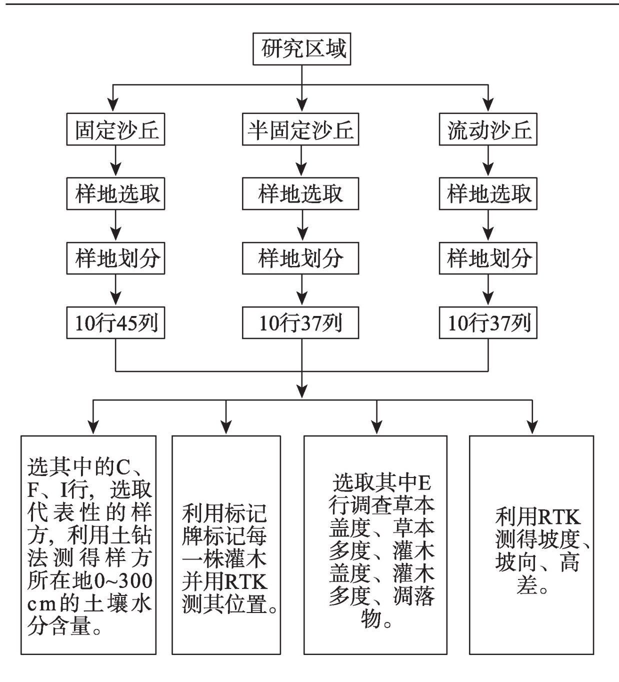
注：1~37表示37列；A~J表示10行。

图1　半固定沙丘的样地示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sample plot in the semi-fixed dunes

2.2　数据分析

2.2.1　土壤水分的划分　以往的研究表明，研究区草本植物主要利用0~40 cm的土壤水分，固沙灌木80%的根系分布在40~200 cm的土层深度范围内，10%左右的固沙灌木根系分布在200~300 cm的土层范围内[11]。因此，本研究将土壤水分划分为表层（0~40 cm）、中层（40~200 cm）和深层（200~300 cm）3部分用于研究其对草本和灌木生长的影响。



注：RTK表示实时动态定位的测量方法。

图2 实验设计流程图

Fig. 2 Experimental design flowchart

2.2.2 地形因子的计算

（1）高差的计算

将实时动态定位的测量方法（RTK）测得的各个定位点的大地坐标系数据转换为直角坐标系数据[12]，每1个点的高差定义为其海拔高度减去整个样地最低点的海拔高度。设 z_a、z_b、z_c、z_d 为每个小样方4个顶点的高差，整个小样方的高差等于4个顶点高差的平均值。

（2）坡度的计算

利用每个小样方的定位点横纵坐标和高差计算每个小样方的坡度、坡向。设 (x_0, y_0, z_0) 为原点坐标，Δx、Δy 为样方的单位长度，$\overrightarrow{P_{i,j}}$ 为标准向量。$\overrightarrow{P_{i,j}}$ 计算公式如下：

$$\overrightarrow{P_{i,j}} = [x_0 + (i-1)\times\Delta x, y_0 + (j-1)\times\Delta y, z_{i,j}] \quad (1)$$

式中：i、j 分别为网格的长度和宽度；$z_{i,j}$ 为 $\overrightarrow{P_{i,j}}$ 在 z 轴的坐标。

设 $\vec{a}$ 和 $\vec{b}$ 为xoy平面的基本向量。$\vec{a}$ 和 $\vec{b}$ 的计算公式如下：

$$\begin{cases} \overrightarrow{a_{i,j}} = \overrightarrow{P_{i+1,j+1}} - \overrightarrow{P_{i,j}} = (\Delta x, \Delta y, z_{i+1,j+1} - z_{i,j}) \\ \overrightarrow{b_{i,j}} = \overrightarrow{P_{i,j+1}} - \overrightarrow{P_{i+1,j}} = (-\Delta x, \Delta y, z_{i,j+1} - z_{i+1,j}) \end{cases} \quad (2)$$

式中：$\overrightarrow{P_{i+1,j+1}}$、$\overrightarrow{P_{i,j+1}}$、$\overrightarrow{P_{i+1,j}}$ 是与 $\overrightarrow{P_{i,j}}$ 相邻的向量；$z_{i+1,j+1}$、$z_{i,j}$、$z_{i,j+1}$、$z_{i+1,j}$ 是向量 $\overrightarrow{P_{i+1,j+1}}$、$\overrightarrow{P_{i,j}}$、$\overrightarrow{P_{i,j+1}}$、$\overrightarrow{P_{i+1,j}}$ 在 z 轴的坐标。

设样方所在的单位法向量为 $\overrightarrow{n_{i,j}}$，等于 $\vec{a}$ 和 $\vec{b}$ 的向量积，计算公式如下：

$$\overrightarrow{n_{i,j}} = \vec{a} \times \vec{b} \quad (3)$$

式中：$\vec{a}$ 和 $\vec{b}$ 是xoy平面的基本向量。

坡度（Q_{slop}）等于 $\overrightarrow{n_{i,j}}$ 和 z 轴之间的夹角，由 $\overrightarrow{n_{i,j}}$ 可以计算出 Q_{slop}，计算公式如下：

$$\begin{cases} u = \dfrac{z_a - z_b}{dis} = \dfrac{\sqrt{2}(z_a - z_b)}{2\Delta xy} \\ v = \dfrac{z_c - z_d}{dis} = \dfrac{\sqrt{2}(z_c - z_d)}{2\Delta xy} \\ Q_{slop} = \tan^{-1}\sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中：如果网格为正方形，Δxy 为网格的基本单元长度；dis为网格的对角线长度；u 为 z_b 点的倾斜角；v 为 z_d 点的倾斜角。

（3）坡向的计算

坡向（Q_{dir}）等于 $\overrightarrow{n_{i,j}}$ 在平面xoy上的投影与 x 轴的夹角，x 轴的方向指向南方。如果网格为正方形，则每个样方 Q_{dir} 的计算方法如下：

当 $u<0$ 时，在公式 $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{v}{u}\right) + \pi$ 中，如果 $v=0$，那么 $\theta=0$，Q_{dir} 表示向东的方向；如果 $v<0$，那么 $0<\theta<90°$，Q_{dir} 表示东偏北的方向；如果 $v>0$，那么 $-90°<\theta<0$，Q_{dir} 表示东偏南方向。

当 $u>0$ 时，在公式 $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{v}{u}\right) + \pi$ 中，如果 $v=0$，那么 $\theta=180°$，Q_{dir} 表示向西的方向；如果 $v<0$，那么 $90°<\theta<180°$，Q_{dir} 表示西偏北的方向；如果 $v>0$，那么 $180°<\theta<270°$，Q_{dir} 表示西偏南方向。

当 $u=0$ 时，在公式 $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{v}{u}\right) + \pi$ 中，如果 $v=0$，那么 $\theta=0$，Q_{dir} 表示坡向在0附近；如果 $v<0$，那么 $\theta=90°$，Q_{dir} 表示向北的方向；如果 $v>0$，那么 $\theta=270°$，Q_{dir} 表示向南方向。

2.2.3 冗余分析（RDA）

1964年Rao首次提出RDA方法，RDA是1种基于约束分析的方法，主要用于分析解释变量和响应变量之间的关系，从1组解释变量中选取出解释能力较大的环境变量，从而揭示数据变异的原因[13]。

在RDA排序图中，样方直接在对应坐标处绘制为点。物种变量则呈现为向量，由原点(0,0)起始，

指向物种得分的对应坐标处[14]，向量的方向表示了该物种丰度增加的方向。解释变量得分同样以向量的形式表示在RDA排序图中，环境向量的长度表示样方物种的分布与该环境因子相关性的大小；向量与约束轴夹角的大小表示环境因子与约束轴相关性的大小，夹角小说明关系密切，若正交则不相关[15]。

3　结果与分析

3.1　土壤水分随深度的变化特征

由图3可见，3种沙丘平均土壤水分的大小顺序为：流动沙丘>半固定沙丘>固定沙丘。同时，3个沙丘平均土壤水分随深度逐渐增加并逐渐趋于稳定；土壤水分的波动程度在表层(0~40 cm)最大，随着深度的增加，土壤水分的波动程度逐渐减小并趋于稳定。并且，半固定沙丘和流动沙丘上土壤水分的波动程度显著高于固定沙丘。

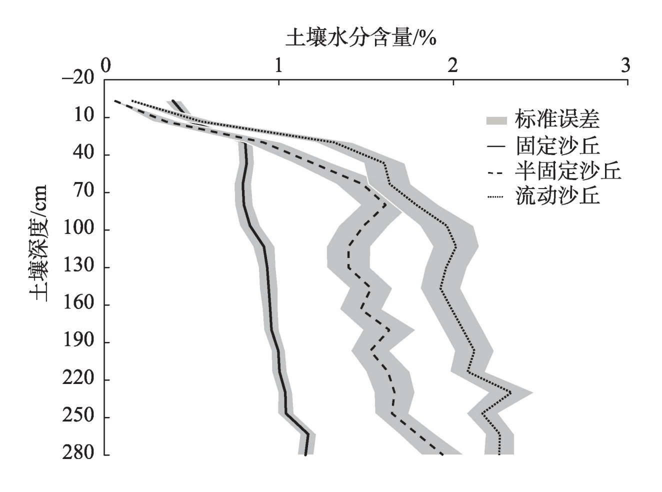


图3　不同类型沙丘上土壤水分含量随土壤深度变化

Fig. 3　Variations of soil moisture content with soil depth on different types of sand dunes

3.2　沙丘不同部位土壤水分的分布特征

本研究将每个类型沙丘上72个采样点按照地形进行了划分，对于3种类型沙丘上0~300 cm的土壤水分含量进行了比较。由图4可见，流动沙丘上不同地形部位的土壤水分高于半固定沙丘和固定沙丘。3种沙丘不同部位0~300 cm平均土壤水分呈现不同的特征。对固定沙丘而言，迎风坡、背风坡、丘顶和丘底在0~300 cm范围内平均土壤水分没有明显的差异，迎风坡土壤水分的波动程度较其他部位略高。对半固定沙丘和流动沙丘而言，迎风坡和

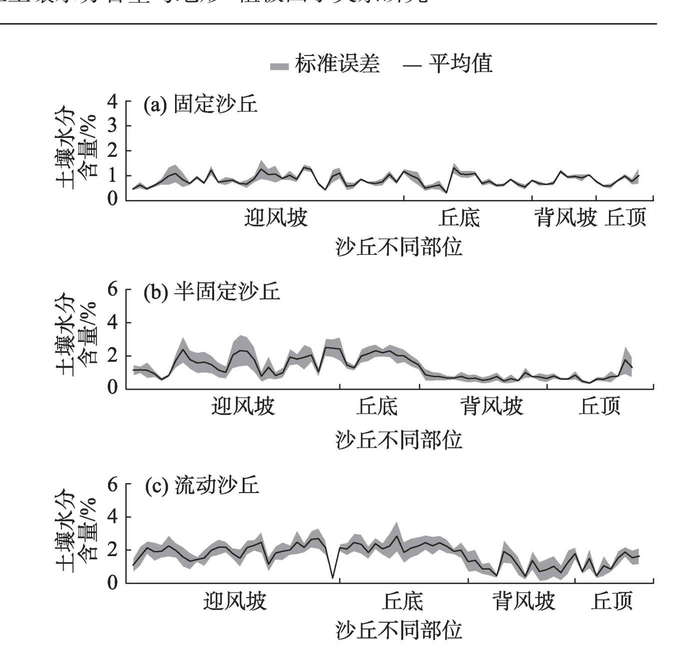


图4　3种类型沙丘上不同部位土壤水分含量比较

Fig. 4　Comparison of soil moisture content in different parts of three types of sand dunes

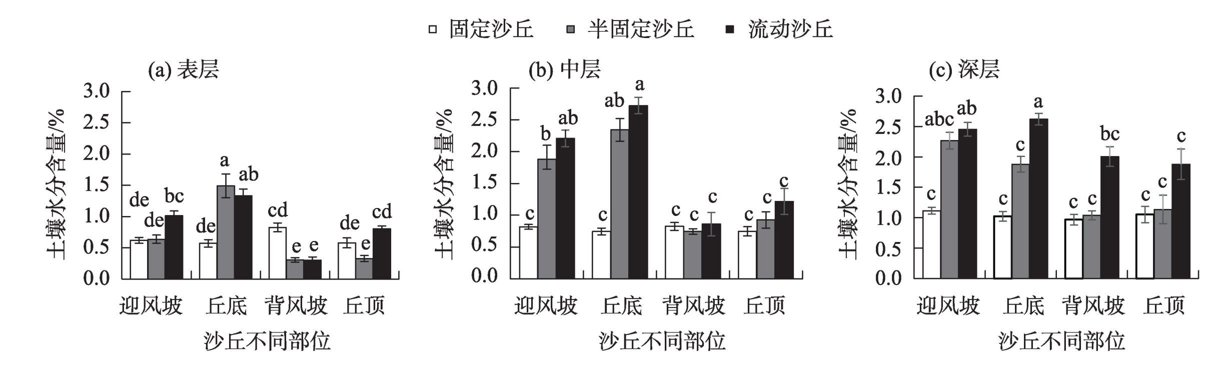
丘底0~300 cm的土壤水分显著的高于背风坡和丘顶，且流动沙丘背风坡和丘顶0~300 cm的土壤水分的波动程度较半固定沙丘高。

3.3　沙丘不同部位表层、中层和深层土壤水分的分布特征

为了进一步确定不同类型沙丘上不同部位表层、中层和深层土壤水分的分布规律，利用单因素方差分析和多重比较对不同类型沙丘上表层(0~40 cm)、中层(40~200 cm)、深层(200~300 cm)土壤水分在不同部位的显著性差异进行了分析(图5)。

表层(0~40 cm)土壤水分在固定沙丘的不同部位之间没有显著差异，半固定沙丘和流动沙丘迎风坡与丘底的表层土壤水分高于背风坡和丘顶的土壤水分(图5a)。具体而言，半固定沙丘上4个部位的土壤水分的大小顺序为：丘底>迎风坡>背风坡和丘顶；其中，背风坡与丘顶之间无显著差异，丘底与迎风坡、丘底与背风坡(包括丘顶)以及迎风坡与背风坡(包括丘顶)之间有显著差异。流动沙丘上，4个部位的表层土壤水分的大小顺序为：丘底>迎风坡>丘顶>背风坡；同时，表层土壤水分在4个部位之间均有显著的差异。

中层(40~200 cm)土壤水分在固定沙丘的不同部位之间没有显著差异，半固定沙丘和流动沙丘迎风坡与丘底的中层土壤水分高于背风坡和丘顶的土壤水分(图5b)。具体而言，半固定沙丘上4个部



注：不同小写字母表示同一部位不同类型沙丘土壤水分含量差异显著。

图5 不同类型沙丘上不同部位表层、中层、深层的土壤水分比较

Fig. 5 Comparison of soil moisture in surface, middle and deep layers in different parts of different types of sand dunes

位的土壤水分的大小顺序为：丘底>迎风坡>丘顶>背风坡。其中，迎风坡与丘底之间、背风坡与丘顶之间均无显著差异，迎风坡与背风坡（包括丘顶）以及丘底与背风坡（包括丘顶）之间有显著差异。流动沙丘上，4个部位的土壤水分的大小顺序为：丘底>迎风坡>丘顶>背风坡。其中，迎风坡与丘底之间、背风坡与丘顶之间均无显著差异，迎风坡与背风坡（包括丘顶）以及丘底与背风坡（包括丘顶）之间有显著差异。

深层（200~300 cm）土壤水分在固定沙丘以及半固定沙丘的不同部位之间均没有显著差异，流动沙丘迎风坡与丘底的土壤水分高于背风坡和丘顶的土壤水分（图5c）。具体而言，流动沙丘上4个不同部位的土壤水分的大小顺序为：丘底>迎风坡>背风坡>丘顶。其中，迎风坡与丘底、背风坡之间无显著差异，背风坡与丘顶之间无显著差异，丘顶与丘底、迎风坡之间存在显著差异。

3.4 土壤水分与地形-植被因子RDA分析

根据去趋势对应分析（DCA）结果中"梯度长度"的第1轴的大小，如果超过4.0，则应选择典范对应分析（CCA）[16]；如果接近3.0~4.0的中间值，则可以选择RDA和CCA；如果低于3.0，则RDA结果优于CCA。本研究DCA分析结果中第1轴的大小仅为0.6，因此本研究使用RDA分析[17]。

对研究样地土壤水分（被解释变量）和地形-植被因子（解释变量）进行RDA分析。RDA排序图详细描述了不同深度土壤水分与地形-植被因子之间的关系。结果表明（表1）：对固定沙丘而言，第1、第2排序轴特征值分别为0.17、0.06；第1、第2排序轴之间的相关系数分别为0.50、0.45，由此可知排序轴与各个因子之间的线性结合程度较弱，不能很好地反映研究对象和地形-植被因子之间的相关关系。前2个排序轴累计解释23.05%的土壤水变化信息。由此可以看出，固定沙丘不同深度的土壤水分受地形-植被因子影响较弱。对半固定沙丘而言，第1、第2排序轴特征值分别为0.49、0.04；第1、第2排序轴之间的相关系数分别为0.78（>0.5）和0.53（>0.5）。由此可知，半固定沙丘上不同深度的土壤水分与地形-植被因子的RDA排序结果是可信的，排序轴与因子之间的线性结合程度较好地反映了土壤水分和地形-植被因子之间的相关关系；前2个排序轴累计解释53.16%的土壤水变化信息。对流动沙丘而言，第1、第2排序轴特征值分别为0.40、0.05；第1、第2排序轴之间的相关系数分别为0.71

表1 土壤水分与地形-植被因子的冗余分析（RDA）结果

Tab. 1 Redundancy analysis (RDA) results of soil moisture and topography-vegetation factors

统计	固定沙丘		半固定沙丘		流动沙丘	
	第1轴	第2轴	第1轴	第2轴	第1轴	第2轴
特征值	0.17	0.06	0.49	0.04	0.40	0.05
累计解释方差/%	17.12	23.05	49.00	53.16	39.61	44.39
相关系数	0.50	0.45	0.78	0.53	0.71	0.61
累计解释拟合方差	73.70	99.21	91.20	98.95	86.98	97.50

(>0.5)、0.61(>0.5)。由此可知，流动沙丘上不同深度土壤水分和地形-植被因子的RDA排序结果是可信的，排序轴与地形-植被因子之间的线性相关程度较好地反映了土壤水分和地形-植被变量之间的关系；前2个排序轴累计解释44.39%的土壤水变化信息。

图6为3种类型沙丘上土壤水分与地形-植被因子的RDA排序结果，地形-植被因子的长度表示其对土壤水分的影响程度的大小。如果不同深度的土壤水分因子与地形-植被因子的方向相同，表示其之间的关系更密切。不同深度的土壤水分因子与地形-植被因子之间夹角的大小表示它们之间相关性的大小，夹角越小，其相关性越高。

从图6a可见，固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形-植被因子有坡向、高差、灌木多度。对表层土壤水分而言，草本盖度、生物量、凋落物、草本多度对其有正相关关系，坡度、高差、灌木盖度、灌木多度对其有负相关；对中层土壤水分而言，坡向、草本多度、草本盖度、灌木盖度对其有正相关，坡度、高差、灌木多度对其有负相关关系；对深层土壤水分而言，坡向、草本多度、草本盖度、灌木盖度、灌木多度与其有正相关关系，坡度、高差、生物量对其有负相关关系。

从图6b可见，半固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形-植被因子有坡向、坡度、高差。对表层土壤水分而言，凋落物对其有正相关关系，坡向、高差、草本盖度、生物量、灌木盖度、草本多度对其有负相关关系；对中层土壤水分而言，凋落物对其有正相关关系，坡向、坡度、高差、草本多度、草本盖度、灌木多度、灌木盖度、生物量对其有负相关关系；对深层土壤水分而言，凋落物、灌木盖度、草本多度对其有正相关关系，坡度、高差、草本盖度、生物量、灌木多度对其有负相关关系。

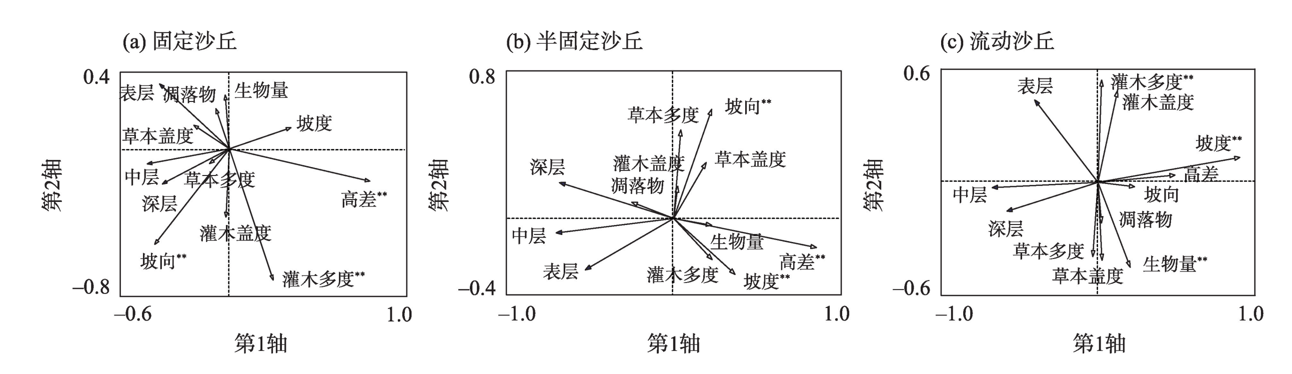
从图6c可见，流动沙丘上对土壤水分影响显著的地形-植被因子有坡度、灌木多度、生物量。对表层土壤水分而言，灌木盖度、灌木多度对其有正相关关系，坡向、坡度、高差、生物量、凋落物、草本多度、草本盖度对其有负相关关系；对中层土壤水分而言，草本多度对其有正相关关系，坡向、坡度、高差、生物量、灌木盖度、灌木多度对其有负相关关系；对深层土壤水分而言，草本多度、凋落物、草本盖度对其有正相关关系，坡向、坡度、高差、灌木多度、灌木盖度对其有负相关关系。

4 讨 论

4.1 不同深度土壤水分的变化特征

腾格里沙漠固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘上0~300 cm的土壤水分随着深度的变化逐渐增加。其中，表层土壤水分波动最大，随着深度的增加土壤水分波动逐渐减小并趋于稳定。这一结论与张军红[7]的研究结论一致。主要原因是由于表层土壤水分受蒸散发、降水、草本植物的多度和盖度、生物土壤结皮等多种因素的影响，特别是沙区地表的蒸发较大，使得其波动程度较大。中层和深层土壤水分主要受降水强度、固沙植物根系对水分的利用等因素影响，与地表的蒸发联系较弱，波动程度较小。

研究区不同类型沙丘上的土壤水分流动沙丘>半固定沙丘>固定沙丘。一方面是由于半固定沙丘和流动沙丘上土壤质地疏松，有利于降水入渗。同时，降水结束后地表很快会形成3~5 cm厚的干沙层，阻止土壤水分的蒸发。另一方面半固定沙丘和



注：**表示在P<0.05水平上该变量对土壤水分含量有显著影响；实心箭头表示自变量，空心箭头表示因变量。

图6 3种类型沙丘上土壤水分与地形-植被因子的RDA排序图

Fig. 6 RDA ranking map of soil moisture and topography-vegetation factors on three types of sand dunes

流动沙丘上固沙植被(包括各种生物土壤结皮)相对稀疏,植物耗水少,降水在其上很难形成径流,绝大部分会入渗到土壤中。固定沙丘相对于半固定沙丘和流动沙丘植被盖度较大、土壤细颗粒含量高、土壤质地紧密并有一定盖度的生物结皮发育,导致表层土壤的阻水能力增加,从而减少降水的入渗量,同时由于具有较高的植被盖度,植物耗水量远大于半固定沙丘和流动沙丘。

整体而言,固定沙丘不同部位0~300 cm范围内以及不同深度(表层、中层和深层)的土壤水分没有显著的差异,相对沙丘的其他部位,迎风坡土壤水分的波动程度较高。因此,应该指定相应的保护措施继续维持固定沙丘上形成的由灌木、草本和生物土壤结皮构成的固沙植被生态系统。

4.2 土壤水分与地形-植被因子之间的关系

沙丘地表的植被类型和覆盖度差异是影响风沙土壤含水量的重要因素。本文研究表明,固定沙丘表层土壤水主要受草本多度、生物量、草本盖度、凋落物的影响,而深层土壤水分主要受坡向、灌木盖度的影响。这一结论与马风云等[18]对于沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性的研究结论基本一致。这是因为草本植物根系浅,主要对表层附近土壤水分影响大,灌木根系较深,对深层土壤水分影响大。同时,固定沙丘不同深度的土壤水分受地形-植被因子的影响较半固定沙丘和流动沙丘弱。固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形-植被因子主要有坡向(负向)、高差(负向)和灌木多度(负向)。因此,应该使固定沙丘上固沙灌木的数量维持在一定的生态水文阈值内,这样才能保持其生态系统的健康[19]。同时,草本植物的盖度和多度对固定沙丘上不同深度的土壤水分均有正向关系。因此,在固沙植被生态系统的保护过程中,应该加强草本植物的保护,防止放牧等不适宜的人类活动对生态系统的破坏。对研究区的半固定沙丘和流动沙丘而言,大部分地形-植被因子对土壤水分均有负向相关关系。因此,如果半固定沙丘和流动沙丘对人类正常的生产活动有较大的影响,应该采取科学合理的固沙措施促使其固化。如果半固定沙丘和流动沙丘没有影响生产活动,可以保护其原有的地貌类型,这也间接上保护了沙漠中的水分,有利于沙区水循环的科学管理。

土壤水分在沙丘的不同地形分布规律不同。本研究表明,固定沙丘上不同部位以及表层、中层和深层土壤水分均无显著差异;半固定沙丘以及流动沙丘上,丘底以及迎风坡水分最高。这一结论与王锐等[20]对腾格里沙漠东南缘流动沙丘不同的坡向和部位土壤水分空间分布研究结论相一致。造成这种现象的原因主要是由于局部地形的不同,植被的分布也不同,形成的土壤生物结皮和成土层厚度不一致。土壤结皮的发育有效提高结皮层土壤含水率和土壤持水力[21],土壤生物结皮和成土层越厚的地方,土壤保水能力越强。丘间低地形成的生物结皮主要是苔藓结皮,结皮层最厚,成土层也最厚;迎风坡结皮为苔藓和藻类混生结皮,厚度次之;背风坡主要是藻类结皮,结皮和成土层都较薄;丘顶部和背风坡相似,局部地方有"活化斑"。因此,土壤含水量的大小顺序为:丘底>迎风坡>背风坡和丘顶。

因此,可在迎风坡的合理位置设置沙障等防风固沙措施,防止固定沙丘活化,进而演变为半固定沙丘和流动沙丘。对半固定沙丘和流动沙丘而言,迎风坡和丘底的土壤水分和其波动程度均高于背风坡和丘顶,在今后植物固沙和生态恢复过程中,首先应当在迎风坡的合理位置设置沙障,防止沙埋、沙蚀等风沙危害。其次,若采用草方格进行固沙,迎风坡和丘底处扎设的草方格和栽植的固沙植物的密度可较背风坡和丘顶处的更加密集一些,这样可以进一步提高生态恢复的速率。

5 结论

本文研究了腾格里沙漠沙坡头地区3种类型沙丘上不同部位、不同深度土壤水分的分布特征以及其与地形-植被因子关系,突破了以往研究只对于一种类型沙丘的不同深度土壤水分研究的局限性,从不同类型沙丘以及沙丘的不同部位、不同深度出发对于土壤水分的分布特征以及其与地形-植被因子的关系出发,得到以下主要结论:

(1) 3种类型沙丘上0~300 cm的土壤水分随着深度的增加而增加,表层土壤水分的波动程度较中层和深层大。

(2) 固定沙丘不同部位0~300 cm范围内以及不同深度(表层、中层和深层)的土壤水分没有明显的差异,迎风坡土壤水分的波动程度较高。半固定沙丘和流动沙丘迎风坡和丘底的土壤水分高于背风坡和丘顶。

（3）固定沙丘不同深度的土壤水分受地形-植被因子的影响较半固定沙丘和流动沙丘弱。影响固定沙丘上土壤水分的地形-植被因子主要有坡向、高差和灌木多度。大部分地形-植被因子与半固定沙丘和流动沙丘上不同深度的土壤水分均有负相关关系。

研究结果对研究区固沙植被生态系统的保护利用和建立科学合理的防风固沙措施提供了科学的依据，对未来该地区固沙植被的建立具有一定的指导意义。建议在防止固定沙丘活化的基础上，综合考虑沙丘类型、沙丘不同部位土壤水分的差异以及土壤水分与地形-植被因子的关系，因地制宜地开展固沙植被建设。同时结合不同类型沙丘上不同部位的生态水文过程进一步探索科学合理的固沙模式。

参考文献（References）

[1] 池政, 徐先英, 刘开琳, 等. 两种沙障内蚀积地表形态及其空间格局观测研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1654−1664. [Chi Zheng, Xu Xianying, Liu Kailin, et al. Erosion and deposition status of surface morphology and observational spatial pattern in two sand barriers[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1654−1664.]

[2] 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲-荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 123−127. [Li Lujun, Jiang Zhirong, Che Kejun, et al. Temporal and spatial variation of soil water in sand dunes at ecotone between oasis and desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 123−127.]

[3] 洪光宇, 王晓江, 王少昆, 等. 沙地土壤水分时空动态研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 390−398. [Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Wang Shaokun, et al. Research progress on spatiotemporal dynamics of soil moisture in sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 390−398.]

[4] 李笑吟, 毕华兴, 张志, 等. 晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 51−56. [Li Xiaoyin, Bi Huaxing, Zhang Zhi, et al. Impact of terrain factors on soil moisture in slopes of western Shanxi Province in loess area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 51−56.]

[5] Abuhashim M, Sayed A, Zelenakova M. Soil water erosion vulnerability and suitability under different irrigation systems using parametric approach and GIS, Ismailia, Egypt[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1057, doi: 10.3390/su13031057.

[6] Fijakowska A. Analysis of the influence of DTM source data on the LS factors of the soil water erosion model values with the use of GIS technology[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 678, doi: 10.3390/rs13040678.

[7] 张军红. 毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013. [Zhang Junhong. Distribution and dynamic of soil moisture in *Artemisia ordosica* community in Mu Us Sandy Land[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.]

[8] 张克存, 安志山, 何明珠, 等. 乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 983−991. [Zhang Kecun, An Zhishan, He Mingzhu, et al. Aeolian sand environments and disaster prevention along Zhongwei section of the Wuhai-Maqin Highway[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 983−991.]

[9] 吴维臻. 坡面尺度土壤水分空间异质性特征及其与地形因子的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 22−26. [Wu Weizhen. Spatial heterogeneity of soil moisture and its relation to topographic factors at hillslope scale[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 22−26.]

[10] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 257−266. [Li Xinrong, Zhang Zhishan, Tan Huijuan, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2014, 44(3): 257−266.]

[11] 李新荣, 张志山, 黄磊, 等. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报, 2013, 58(5−6): 397−410. [Li Xinrong, Zhang Zhishan, Huang Lei, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(5−6): 397−410.]

[12] 任振娜. 基于DEM模型实现地形分析算法——坡度计算与坡向分析[J]. 电脑编程技巧与维护, 2012(15): 81−82. [Ren Zhenna. Realization of terrain analysis algorithm based on DEM model: Slope calculation and slope aspect analysis[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2012(15): 81−82.]

[13] 李春茂. 喀斯特坡地与梯地土壤水分变化特征研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019: 23−25. [Li Chunmao. Study on the characteristics of soil moisture variation in karst hill slopes and terraces [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019: 23−25.]

[14] 桂洪杰. 黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 32−39. [Gui Hongjie. Comparative studies on characteristics of grain size and elements of the four deserts in Ningxia-Inner Mogolia section of the Yellow River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013: 32−39.]

[15] 王甜, 康峰峰, 韩海荣. 山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3902−3911. [Wang Tian, Kang Fengfeng, Han Hairong. Factors influencing spatial heterogeneity of soil moisture content in a small catchment of Mount Taiyue, Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (11): 3902−3911.]

[16] 易明波. 大沟流域主要植被土壤有机碳贮量及其影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008: 35−39. [Yi Mingbo. Study on soil organic carbon storage under principal vegetations and relationship

with environment factors in the Dagou Valley[D]. Chongqing: Southwest University, 2008: 35−39.]
[17] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件Canoco5介绍[J]. 生物多样性, 2013, 21(6): 765−768. [Lai Jiangshan. Canoco5: A new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(6): 765−768.]
[18] 马风云, 李新荣, 张景光. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789−795. [Ma Fengyun, Li Xinrong, Zhang Jingguang. Spatial heterogeneity of soil moisture with artificial sand-fixing vegetation in Shapotou[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 789−795.]
[19] 张定海, 李新荣, 张鹏. 生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 678−688. [Zhang Dinghai, Li Xinrong, Zhang Peng. Significance of eco-hydrological threshold in artificial vegetation ecosystem in China desert area[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 678−688.]
[20] 王锐, 孙权, 吴向伟. 腾格里沙漠东南缘不同地形下土壤水分空间变化动态研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 756−759. [Wang Rui, Sun Quan, Wu Xiangwei. The spatial dynamics of the soil moisture under different terrain conditions in the southeast edge of Tengger Desert[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(4): 756−759.]
[21] 李昌龙, 吴昊, 姜生秀, 等. 梭梭林土壤结皮发育对黄花补血草种子萌发和种群特征的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 830−837. [Li Changlong, Wu Hao, Jiang Shengxiu, et al. Effects of soil crust development on seed germination and population characteristics of *Limonium aureum* under *Haloxylon ammodendron* plantations[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 830−837.]

Relationship between soil moisture content and topography-vegetation factors in different types of dunes in the Tengger Desert

SUN Yanhui[1], ZHANG Dinghai[1], ZHANG Zhishan[2]
(1. Center for Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Shapotou Desert Research and Experimental Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Soil moisture is a major ecological limiting factor in desert areas, and the distribution of soil moisture is influenced by numerous factors, such as climate, topography, and vegetation. In this paper, three types of sand dunes (fixed dunes, semi-fixed dunes, and mobile sand dunes) at the Shapotou of Tengger Desert, China are studied. A comprehensive analysis of the distribution characteristics of the soil moisture in different parts of the dune and at different depths and the relationship of the soil moisture distribution with topographical and vegetation-related factors was conducted using analysis of variance (ANOVA) and redundancy analysis (RDA). The results show that: (1) Soil moisture at depths of 0−300 cm in different types of sand dunes increased with depth, and the degree of fluctuation of the soil moisture was greater in the surface layer than that in the middle and deep layers. (2) There is no significant difference in soil moisture between different parts of fixed dunes and different depths, and soil moisture on the windward slopes and at bottom of semi-fixed dunes and mobile sand dunes is higher than that on the leeward slopes and top of the dunes. (3) The soil moisture in fixed dunes is less influenced by topographical and vegetation-related factors than that in semi-fixed dunes and mobile sand dunes; the main factors affecting soil moisture in fixed dunes are slope orientation, height difference, and shrub abundance. (4) Overwhelmingly, topographical and vegetation-related factors were found to have a negative relationship with soil moisture for both semi-fixed dunes and mobile sand dunes in the study area. This study is important for the understanding of the distribution and characteristics of soil moisture in the study area as well as for the ecological restoration and reconstruction in desert areas. Based on the results of this study, it is suggested that the future construction of sand-fixing vegetation in the study area should consider corresponding wind and sand-fixing measures; research should also be undertaken into establishing a scientifically derived distribution of sand-fixing plants.

Key words: Tengger Desert; soil moisture; topography factor; vegetation factor; redundancy analysis (RDA)